

В.В. Височин, В.Р. Нікульшин, А.Є. Денисова

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРІЄНТАЦІЇ ДВОСТОРОННІХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЇХНЮ ЕЛЕКТРИЧНУ ПОТУЖНІСТЬ

Розроблений метод аналітичного визначення опромінення, температурного режиму, а також вироблення електроенергії двосторонніх сонячних елементів при різній орієнтації панелей. Створено інтегральну математичну модель для оцінки енергетичного режиму роботи сонячних елементів при змінних кліматичних умовах і просторових настановних характеристик. Проведені аналітичні дослідження роботи сонячних елементів. Показані особливості опромінення передньої й тильної сторін сонячних панелей, умови формування температурного режиму роботи і його впливу на вироблення електроенергії. Розглянуто можливості формування раціональних умов просторової орієнтації панелей за фактором електричної продуктивності. Використання запропонованої методики й результатів аналізу, проведених на її основі, дозволяє вибрати раціональну архітектуру сонячної електростанції високої ефективності. Бібл. 13, рис. 5.

Ключові слова: двосторонні сонячні фотопанелі, опромінення сонячних панелей, орієнтація сонячних елементів, виробництво електроенергії.

Разработан метод аналитического определения облучения, температурного режима, а также выработки электроэнергии двухсторонних солнечных элементов при различной ориентации панелей. Создана интегральная математическая модель для оценки энергетического режима работы солнечных элементов при переменных климатических условиях и пространственных установочных характеристиках. Проведены аналитические исследования работы солнечных элементов. Показаны особенности облучения передней и тыльной сторон солнечных панелей, условия формирования температурного режима работы и его влияния на выработку электроэнергии. Рассмотрены возможности формирования рациональных условий пространственной ориентации панелей по фактору электрической производительности. Использование предложенной методики и результатов анализа, проведенных на ее основе, позволяет выбрать рациональную архитектуру солнечной электростанции высокой эффективности. Библ. 13, рис. 5.

Ключевые слова: двухсторонние солнечные фотопанели, облучение солнечных панелей, ориентация солнечных элементов, производство электроэнергии.

Вступ. Двосторонні сонячні елементи (СЕ) з'явилися в результаті пошуку методів найбільш ефективного використання коштовного напівпровідникового шару, що абсорбує для електрогенерації сонячне випромінювання [1-4]. Їхня перевага полягає в додатковому опроміненні абсорбера з тильної сторони СЕ, що у звичайних однобічних пристроях не здійснюється. Очевидно, що опромінення пов'язане з орієнтацією СЕ щодо його джерела випромінювання. Двостороннє опромінення впливає на енергетичний баланс, змінюючи експлуатаційні параметри СЕ: робочу температуру й електрогенерацію, які, як відомо, взаємозалежні [4, 5].

Стимулювання інтенсивності опромінення приводить до зміни енергетичного балансу – не завжди убик підвищення ефективності. Ця обставина накладає обмеження на застосовність таких пристроїв, викликаючи необхідність у додаткових заходах щодо зміни способу організації роботи СЕ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значну увагу приділено дослідженню температурних умов роботи сонячних елементів [3-7]. Існуючі моделі по визначенню енергетичних показників сонячних елементів базуються на поданні про однобічне фронтальне опромінення пристрою. Однак тильна сторона, сприймаючи променисту енергію, вносить відповідний вплив в загальний баланс енергії [3, 4]. Серед різних факторів впливу на опромінення важливим, з погляду керування режимом роботи, є геометричний, тобто просторове розміщення сонячного елемента. Для вибору орієнтації двосторонніх сонячних батарей пропонуються різні варіанти [8, 9], однак вони не мають достатнього обґрунтування, зокрема не урахується вплив радіаційної компоненти на тильну сторо-

ну панелі. Тому для аналізу реальних умов роботи сонячного елемента необхідна модель, що описує особливості опромінення абсорбера й вплив орієнтації СЕ на енергетичні процеси.

Математичні моделі, що використовуються для досліджень, у якості зовнішніх умов включають радіаційну [3, 4, 7, 10, 11] та конвективну складові. Останню, як правило, пов'язують з вітровою взаємодією [5, 8]. Обидві складові мають залежність від орієнтації панелі. Опис впливу радіаційної компоненти на фронтальну поверхню може базуватись на достатньо надійних модельних уявленнях [6-8, 11-13].

Для тильної сторони в [4] були проведені дослідження впливу відбивальної здатності різних поверхонь. В [3] запропонована динамічна трислойна модель сонячного елемента, у яку включено радіаційну складову взаємодії з тильною стороною. Результати робіт показали підвищення температури в двосторонніх панелях з урахуванням опромінювання. Але вплив опромінення у динаміці денної і сезонної зміни орієнтації щодо джерела не показаний.

Для аналітичного опису опромінення поверхні може бути використаний метод [10], розроблений для умов України. Відповідно до нього інтенсивність радіаційного потоку визначається для горизонтальної поверхні як функція від географічних параметрів, сезонності й часу доби. Поправка R , яка конкретизує нахил і орієнтацію поверхні, що представлена у вигляді відношення потоку прямої сонячної радіації, яке надходить по нормалі на нахилену поверхню, до потоку радіації на горизонтальну поверхню, визначають у вигляді:

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + \frac{H_d}{H} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \frac{1 - \cos \beta}{2} \cdot \rho, \quad (1)$$

де H_d – прихід дифузійної радіації на горизонтальну поверхню, як частина від інтегральної радіації на горизонтальну поверхню H ; R_b – відношення приходів прямої сонячної радіації на нахилу й горизонтальну поверхні; β – кут нахилу поверхні; ρ – відбивна здатність ґрунту.

Ця залежність може бути застосована для поверхні, що перебуває на південній стороні. Вона враховує пряму сонячну радіацію (перший член), розсіяну в атмосфері (другий член, що показує, яка частина небозводу видна з поверхні) і відбиту від поверхні землі (третій член, що показує частку відбитої сумарної радіації). Для тильної сторони поверхні подібних методичних положень не має.

Мета роботи полягає у розробці методу визначення опромінення та енергетичних показників двосторонніх сонячних елементів; створення на його основі інтегрованої математичної моделі щодо вивчення енергетичного режиму роботи СЕ в різних кліматичних і установчих умовах експлуатації; дослідження енергетичних режимів роботи СЕ.

Математична модель. Для формалізації завдання щодо розташування сонячної панелі використана наступна термінологія. Орієнтація за віссю «південь-північ» (S-N) реалізується, коли нормаль до лицьової (аверсної) поверхні сонячної панелі спрямована на південь із азимутом 0 градусів. Орієнтація «схід-захід» (E-W) завдає напрямком нормалі аверсної поверхні на схід.

Для тильної сторони приймача, орієнтованого за віссю S-N, пряма складова відсутня, відповідно, складова відбитого випромінювання для зворотної сторони не має включати пряме випромінювання. Таким чином, для тильної сторони поверхні, орієнтованої за віссю S-N, відношення потоків радіації R_r визначиться у вигляді

$$R_r = \frac{H_d}{H} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} + \frac{1 + \cos \beta}{2} \rho \right). \quad (2)$$

Для поверхонь, орієнтованих за віссю E-W, метод розрахунку такий самий, однак для орієнтації поверхні «на схід» кут азимута $\gamma = +90^\circ$, «на захід» $\gamma = -90^\circ$. Пряма складова для задньої сторони з'являється після полуденного часу при зенітному куті $\theta_z \geq 90 - \beta$.

Енергетичний баланс двостороннього СЕ має свої особливості. Опромінення зовнішніх поверхонь відбувається так само, як і для однобічної батареї. Промениста енергія поглинається як лицьовою, так і тильною сторонами СЕ. Однак в однобічному СЕ активна променепоглинаюча поверхня (абсорбер) опромінюється тільки з однієї сторони – передньої. Енергія, що надходить на зворотну сторону, у процесі виробництва електроенергії не бере участь, – вона витрачається на нагрівання пристрою, у тому числі абсорбера. У двосторонньому СЕ абсорбер опромінюється з двох сторін. Але опромінення абсорбера з тильної сторони характеризується особливостями, пов'язаними з тим, що ця сторона має спеціальне

напівпрозоре покриття для зниження електронно-діркової рекомбінації носіїв заряду. Тому променепропускання з тильної сторони менше, ніж з лицьової. Відповідно, оптичні характеристики ($\tau\alpha$), що визначають пропускання прозорим покриттям і поглинання абсорбера, для лицьової й тильної сторін будуть різними.

Рівняння енергетичного балансу для двостороннього СЕ можна представити у вигляді

$$[H \cdot R \cdot (\tau\alpha) \cdot (1 - \eta_{ph})]_a + [H \cdot R \cdot (\tau\alpha) \cdot (1 - \eta_{ph})]_r = U \cdot (T_{ab} - T_a), \quad (3)$$

де η_{ph} – коефіцієнт ефективності перетворення сонячної енергії в електричну (ККД); U – коефіцієнт втрат тепла; T_{ab} – температура абсорбера; T_a – температура зовнішнього повітря; індекси: a – аверсна сторона СЕ; r – реверсна сторона СЕ.

Величину ККД η_{ph} шляхом регулювання зазвичай намагаються витримувати на максимальному рівні $\eta_{ph} = \eta_{ph,max}$. Коефіцієнт $\eta_{ph,max}$ залежить від різних факторів і, зокрема, від температури. Залежність $\eta_{ph,max}$ від температури в області додатних температур може бути описана в такому виді [12]

$$\eta_{ph,max} = \eta_{maxST} \cdot [1 + \alpha_p \cdot (T_{ab} - T_{ST})], \quad (4)$$

де η_{maxST} – ККД сонячного елемента в точці максимальної потужності при стандартних умовах; α_p – температурний коефіцієнт потужності СЕ, K^{-1} ; T_{ST} – температура сонячного елемента при стандартних умовах.

Під стандартними умовами розуміють наступне: густина потоку сонячного випромінювання $H_{ST} = 1 \text{ кВт/м}^2$, температура поверхні СЕ $T_{ST} = 25^\circ \text{C}$.

Для двостороннього елемента ККД визначають для кожної зі сторін при однакових умовах опромінення. При однобічному опроміненні абсорбера рівняння енергетичного балансу буде відрізнятися відсутністю для реверсної сторони фактора перетворення сонячної енергії в електричну: $(1 - \eta_{ph})_r$.

Рішення рівняння енергії з урахуванням наданих залежностей щодо температури абсорбера двостороннього опромінення має вигляд

$$T_{ab} = \frac{[H \cdot R \cdot (\tau\alpha)]_a + [H \cdot R \cdot (\tau\alpha)]_r - (1 - \alpha_p T_{ST}) \cdot \{K\} + U \cdot T_a}{U + \alpha_p \cdot \{K\}}, \quad (5)$$

$$\text{де } \{K\} = \sum_{a,r} [H \cdot R \cdot (\tau\alpha) \cdot \eta_{maxST}]_i.$$

Електричну потужність СЕ слід знаходити з урахуванням його температури [12]

$$P = P_{rat} \cdot k_{r,e} \frac{H}{H_{ST}} [1 + \alpha_p \cdot (T_{ab} - T_{ST})], \quad (6)$$

де P_{rat} – номінальна потужність СЕ при стандартних умовах; $k_{r,e}$ – коефіцієнт зниження ефективності СЕ.

При однобічному опроміненні абсорбера $H = H_a$. При двосторонньому опроміненні виробництво електроенергії не є лінійною функцією спільного опромінення лицьової й тильної сторін [13]. Цей фактор враховується коефіцієнтом двосторонньої ефективності η_e . Тому ефективне опромінення може бути представлена як

$$H = H_a + H_r \cdot \eta_e = H \cdot R_a + H \cdot R_r \cdot \eta_e. \quad (7)$$

Аналіз енергетичного режиму при різних способах орієнтації. Дослідження проводились для умов України на широті 46° .

Особливості виробництва електроенергії обумовлені двома факторами. Перший – інтенсивність опромінення панелі. Інтенсивність добре корелюється з виробництвом електроенергії. Тому такий фактор може вважатися основним. Другий фактор – температура нагрівання абсорбера, ріст якої зменшує ККД батареї й знижує термін служби.

Для нагрівання абсорбера характерним є істотно змінний характер залежності температури від часу доби (рис. 1). При орієнтації S-N температура плавно зростає в першій половині дня та зменшується у другій. Вид кривих залежності протягом усього року й для різних кутів нахилу є симетричним щодо полуденного часу. Температура абсорбера влітку, як і продуктивність, у значній мірі залежить від кута нахилу, а взимку такого впливу практично немає.

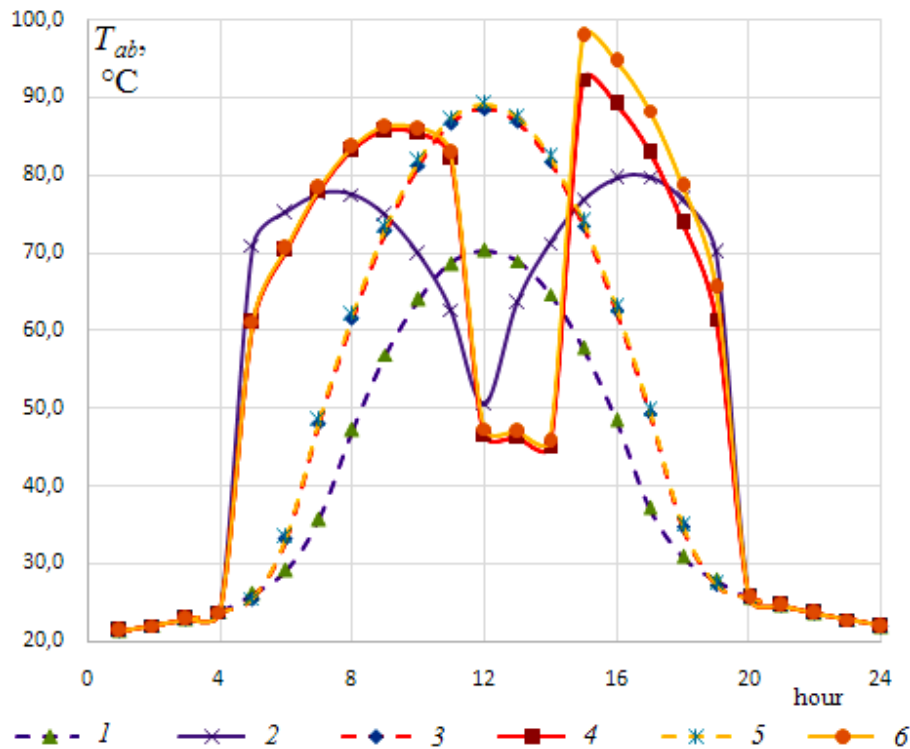


Рис. 1. Денна термограма абсорбера в літній період для різних орієнтацій, кутів нахилу й типів СЕ (односторонній - 1s, двосторонній -2s): 1 – S-N, 90° , 2s; 2 – E-W, 90° , 2s; 3 – S-N, 45° , 2s; 4 – E-W, 45° , 2s; 5 – S-N, 45° , 1s; 6 – E-W, 45° , 1s

При орієнтації E-W зміна температури протягом дня більш складна. Симетрія щодо полуденного часу спостерігається тільки влітку – для вертикального розташування панелі. Вид температурних кривих відрізняється значно більшим інтегральним заповнюванням графічного поля в ранковий і вечірній періоди та наявністю провалу в полуденний час, у порівнянні з орієнтацією S-N. Це пов'язане з особливостями опромінення панелі.

Загальною тенденцією, що відзначена за результатами аналізу, є зростання температури при зменшенні кута нахилу. У літній період, коли температура абсорбера найбільша, її рівень перевищує той, що рекомендується звичайно для СЕ (45 - 50°C), і досягає великого значення (у нашому прикладі 94°C).

Порівняння температурних режимів двосторонніх і односторонніх панелей показує (рис. 1), що рівні нагрівання абсорбера в найбільш теплонапружений період (літній) в обох варіантах практично збігаються. Однак при орієнтації E-W у післяполуденні години односторонній СЕ нагрівається сильніше. Це є наслідком наявності надлишкової теплоти при обмеженості використання сонячної енергії для вироблення електрики.

Близькі температури нагрівання абсорбера в розглянутих варіантах пояснюються невеликою часткою опромінення сторони СЕ, що перебуває в тіні (рис. 2). Тому передня поверхня є визначальною при формуванні температури абсорбера, як для одно-, так і для двосторонньої панелей. Закономірності зміни опромінення схожі для кутів нахилу 90° і 45° , однак максимальне значення в останньому випадку більше, при тому, що інтенсивність опромінення задньої панелі менше.

Опромінення східної сторони при орієнтації E-W на початку дня, з 4 до 12 години, різко змінюється: відбувається зростання і наступне падіння зі значним темпом (рис. 3). Після 12 години темп падіння знижується. У цій частині дня опромінення реверсної сторони значно менше. Картина зміни опромінення сторін при орієнтації E-W є дзеркальною щодо полуденного часу. У післяполуденні години якийсь час сонячне випромінювання не попадає на зворотну сторону нахиленої панелі, тому загальне опромінення її в цей період менше. Коли зенітний кут досягає значення $\theta_z \geq 90 - \beta$, з'являється пряма складова. Для вертикальної панелі $\theta_z = 0$ і такий перехід відбувається практично непомітно.

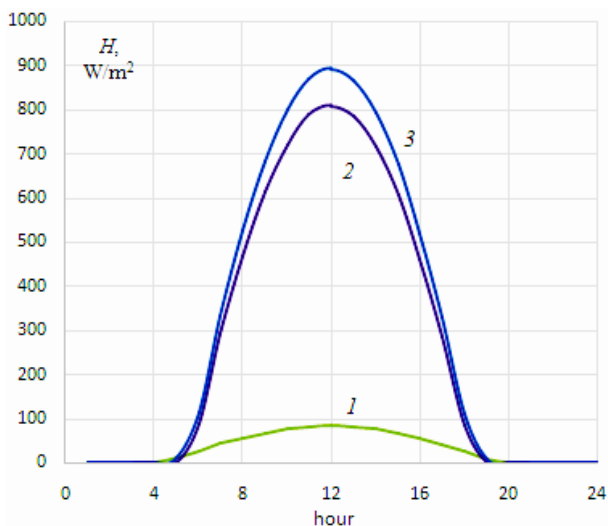


Рис. 2. Густина потоку випромінювання на СЕ при орієнтації S-N і куті нахилу 45° (спрямованість сторін: 1 – північна; 2 – південна; 3 – сумарна)

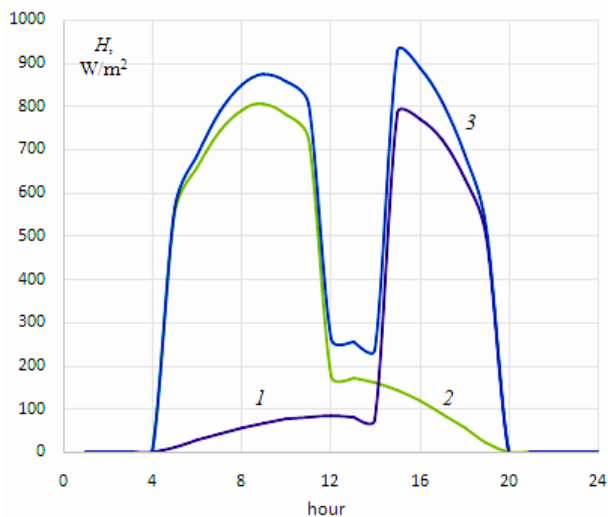


Рис. 3. Густина потоку випромінювання на СЕ при орієнтації E-W і куті нахилу 45° (спрямованість сторін: 1 – східна; 2 – західна; 3 – сумарна)

Таким чином, у першій половині дня превалює інтенсивність випромінювання на аверсній стороні, у другій – на реверсній, що й визначає переважний вплив однієї зі сторін на нагрівання. Сумарне опромінення, на відміну від того, що падає на кожен сторону, виявляється більшою мірою згладженим, хоча й зі спадом у полуденні години.

На рис. 4 представлені дані по добовому розгорненню продуктивності панелі при двох розглянутих орієнтаціях в літній період. При напрямку за віссю S-N основний час виробництва електроенергії – це середина дня, для E-W – початок і кінець дня. Такі ж залежності характерні й для інших періодів року. Інтегральна кількість електрогенерації, що може бути вироблена за світловий день при орієнтації S-N, є меншою, ніж при E-W. Щодо даних на рис. 4, то у липні її рівень складає $1534 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ і $1864 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ відповідно.

Характер кривих зміни потужності електричної генерації СЕ протягом світлового дня корелюється з опроміненням і температурою панелі (рис. 2 – рис. 4).

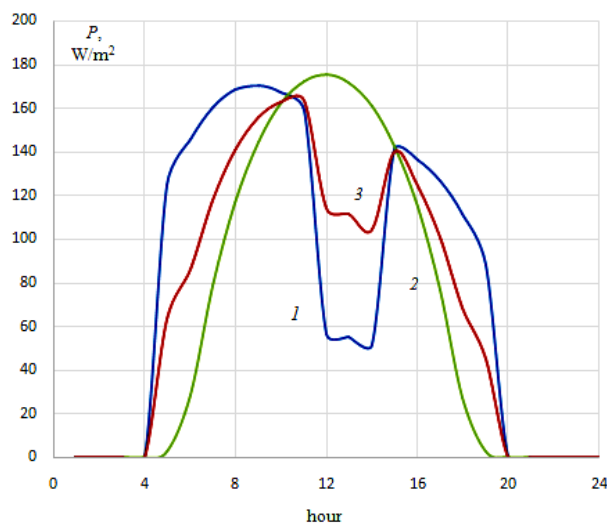


Рис. 4. Потужність електричної генерації СЕ в розгорненні доби для літнього періоду при куті нахилу 45° і орієнтації: 1 – S-N; 2 – E-W; 3 – (S-N) + (E-W)

Відзначені особливості на практиці можуть мати кон'юнктуру привабливості, і для певних споживачів така ситуація може бути сприятливою. Разом з тим, представлені на рис. 4 дані дозволяють зробити важливий для практичного застосування висновок. Зі суміщення кривих 1 і 2 видно, що одночасна робота панелей з різною орієнтацією вирівнює продуктивність станції протягом світлового дня. Сукупне виробництво електроенергії панелями різної орієнтації (крива 3) характеризується підвищеною рівномірністю та керованим інтегральним заповнюванням денного графіка. Так, кількість денного сукупного виробництва електроенергії при однаковому співвідношенні розмірів різноспрямованих панелей для даних на рис. 4 становить $1699 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Зміна співвідношення кількості панелей з різною орієнтацією дозволяє підвищувати або знижувати денну продуктивність в інтервалі рівнів складових орієнтацій і керувати полуденним спадом виробництва. Таким чином можна підлаштувати графіки виробництва і споживання енергії.

З аналізу впливу орієнтації СЕ на продуктивність випливає, що гірші умови генерації електроенергії спостерігаються при спрямованості за віссю S-N і куті нахилу 90° . Орієнтація E-W є кращою при різних кутах нахилу. Вплив нахилу на продуктивність у літній період проявляється в значній мірі тільки для установки СЕ за віссю S-N. Електрична продуктивність зростає зі зменшенням нахилу. У період з вересня по квітень ефективність роботи СЕ мало залежить від кута установки. У цей період основний вплив має орієнтація СЕ.

З огляду на різний ступінь залежності продуктивності СЕ від основних параметрів і сезонність визначальних зв'язків, найбільш інформативним є розгляд продуктивності СЕ за сумарним загальнорічним показником.

На рис. 5 представлені дані щодо вироблення електроенергії протягом року для розглянутих чотирьох варіантів установки СЕ. Як бачимо, найкращим є варіант із орієнтацією за віссю E-W, найгіршим – за віссю S-N. Варіанти з орієнтаціями за віссю E-W, кут

нахилу 90° , і за віссю S-N, кут нахилу 45° є близькими за ефективністю.

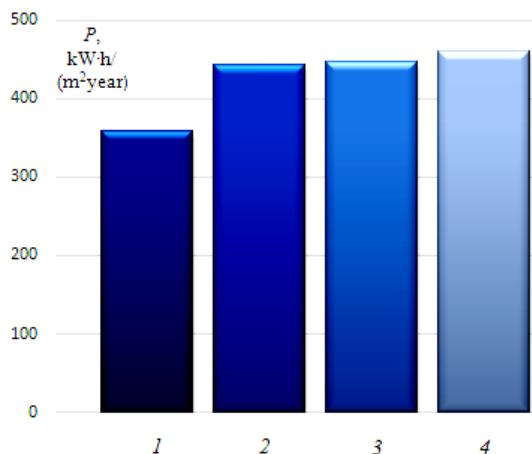


Рис. 5. Річне виробництво електроенергії залежно від орієнтації й кута нахилу СЕ:

1 – S-N, 90° ; 2 – E-W, 90° ; 3 – S-N, 45° ; 4 – E-W, 45°

Висновки.

Розроблено метод визначення двостороннього опромінювання сонячних елементів, за допомогою якого створено інтегровану математичну модель енергетичного режиму роботи СЕ в залежності від його просторового розміщення. Модель дозволяє проводити більш точний, в порівнянні з існуючими методами, аналіз ефективності роботи СЕ при різних способах орієнтації і створювати раціональну архітектуру електричної станції.

За результатами аналітичного дослідження показано:

1. У літній період температура СЕ майже вдвічі перевищує ту, що звичайно рекомендується ($45\text{--}50^\circ\text{C}$). Рівні нагрівання абсорбера двосторонніх і односторонніх панелей практично збігаються. Однак при орієнтації E-W у післяполуденні години односторонній СЕ нагрівається сильніше. Це є наслідком наявності надлишкової теплоти при обмеженості використання сонячної енергії для вироблення електрики.

2. Застосування двосторонньої фотопанелі для всіх способів орієнтації є додатним за електричною продуктивністю. Найбільший ефект від двостороннього опромінення сонячної панелі може бути отриманий при спрямуванні за віссю E-W. Зі зменшенням кута нахилу, починаючи від рівня 90° , сумарне опромінення панелі зростає. Залежність річного виробництва електрики від кута нахилу найбільше проявляється для орієнтації S-N, і для кутів 90° і 45° різниця досягає 26 %. Різниця річного виробництва між орієнтаціями E-W і S-N при куті нахилу 45° мала і становить близько 3 %.

При куті 90° і напрямку E-W річне виробництво на 24 % більше, ніж при S-N. Між тим, при орієнтації E-W продуктивність вертикальної панелі є гіршою тільки на 2,6 % в порівнянні з панелями, нахиленими під кутом 45° . Тому, таке розташування виправдане за умови застосування, наприклад, для огорожі або облицюванні фасаду.

3. Комбінування фотопанелей з різним способом просторового розміщення дозволяє керувати рівнем

виробництва електроенергії протягом світлового дня, підлаштовуючи графіки виробництва і споживання енергії. Зміна співвідношення кількості панелей з різною орієнтацією дозволяє підвищувати або знижувати денну продуктивність в інтервалі рівнів складових орієнтацій і керувати рівнем полуденного спаду виробництва електроенергії.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gu W., Ma T., Ahmed S., Zhang Y., Peng J. A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 223, art. no. 113283. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113283>.
2. Guerrero-Lemus R., Vega R., Kim T., Kimm A., Shephard L.E. Bifacial solar photovoltaics – A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1533-1549. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.041>.
3. Tina G.M., Scavo F.B., Gagliano A. Multilayer thermal model for evaluating the performances of monofacial and bifacial photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 1035-1043. doi: <https://doi.org/10.1109/jphotov.2020.2982117>.
4. Zhang Z., Wu M., Lu Y., Xu C., Wang L., Hu Y., Zhang F. The mathematical and experimental analysis on the steady-state operating temperature of bifacial photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 2020, vol. 155, pp. 658-668. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.121>.
5. Jaszczur M., Hassan Q., Teneta J., Majewska E., Zych M. An analysis of temperature distribution in solar photovoltaic module under various environmental conditions. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 11th International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2018), vol. 240, art. no. 04004. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824004004>.
6. Bryan J.L., Silverman T.J., Deceglie M.G., Holman Z.C. Thermal model to quantify the impact of sub-bandgap reflectance on operating temperature of fielded PV modules. *Solar Energy*, 2021, vol. 220, pp. 246-250. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.045>.
7. Zhou J., Zhang Z., Ke H. PV module temperature distribution with a novel segmented solar cell absorbance model. *Renewable Energy*, 2019, vol. 134, pp. 1071-1080. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.014>.
8. Wu S.-Y., Guo H.-T., Xiao L., Chen Z.-L. Experimental investigation on thermal characteristics and output performance of PV panel under linear light source and windy conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 43, art. no. 100918. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100918>.
9. Ruzaimi A., Shafie S., Hassan W.Z.W., Azis N., Effendy Ya'acob M., Elianddy E. Temperature distribution analysis of monocrystalline photovoltaic-thermoelectric generator (PV-TEG) hybrid application. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 858-876. doi: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp858-867>.
10. Высочин В. Математическая модель гелиосистемы с сезонным аккумулятором тепла. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2011, вип. 2(36), С. 125-129. Режим доступу: <https://pratsi.opu.ua/articles/show/695> (Дата звернення: 21.06.2020).
11. Gong Y., Wang Z., Lai Z., Jiang M. TVACPSO-assisted analysis of the effects of temperature and irradiance on the PV module performances. *Energy*, 2021, vol. 227, art. no. 120390. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120390>.
12. Wysochin V., Verstak N. Efficiency of use of a hybrid solar collector. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2018, вип. 2(55), с. 66-71. doi: <https://doi.org/10.15276/opu.2.55.2018.07>.

13. Pan A.C., Del Canizo C., Luque A. Effect of thickness on bifacial silicon solar cells. *2007 Spanish Conference on Electron Devices*, 2007, pp. 234-237. doi: <https://doi.org/10.1109/sced.2007.384035>.

REFERENCES

1. Gu W., Ma T., Ahmed S., Zhang Y., Peng J. A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 223, art. no. 113283. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113283>.
2. Guerrero-Lemus R., Vega R., Kim T., Kimm A., Shephard L.E. Bifacial solar photovoltaics – A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1533-1549. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.041>.
3. Tina G.M., Scavo F.B., Gagliano A. Multilayer thermal model for evaluating the performances of monofacial and bifacial photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 1035-1043. doi: <https://doi.org/10.1109/jphotov.2020.2982117>.
4. Zhang Z., Wu M., Lu Y., Xu C., Wang L., Hu Y., Zhang F. The mathematical and experimental analysis on the steady-state operating temperature of bifacial photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 2020, vol. 155, pp. 658-668. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.121>.
5. Jaszczur M., Hassan Q., Teneta J., Majewska E., Zych M. An analysis of temperature distribution in solar photovoltaic module under various environmental conditions. *MATEC Web of Conferences, 2018, 11th International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2018)*, vol. 240, art. no. 04004. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824004004>.
6. Bryan J.L., Silverman T.J., Deceglie M.G., Holman Z.C. Thermal model to quantify the impact of sub-bandgap reflectance on operating temperature of fielded PV modules. *Solar Energy*, 2021, vol. 220, pp. 246-250. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.045>.
7. Zhou J., Zhang Z., Ke H. PV module temperature distribution with a novel segmented solar cell absorbance model. *Renewable Energy*, 2019, vol. 134, pp. 1071-1080. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.014>.
8. Wu S.-Y., Guo H.-T., Xiao L., Chen Z.-L. Experimental investigation on thermal characteristics and output performance of PV panel under linear light source and windy conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 43, art. no. 100918. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100918>.
9. Ruzaimi A., Shafie S., Hassan W.Z.W., Azis N., Effendy Ya'acob M., Elianddy E. Temperature distribution analysis of monocrystalline photovoltaic-thermoelectric generator (PV-TEG) hybrid application. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 858-876. doi: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp858-867>.
10. Wysochin V.V. Mathematical model of a solar-plant system with the seasonal heat accumulator. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2011, iss. 2(36), pp. 125-129. (Rus). Available at: <https://pratsi.opu.ua/articles/show/695> (accessed 21 June 2020).

11. Gong Y., Wang Z., Lai Z., Jiang M. TVACPSO-assisted analysis of the effects of temperature and irradiance on the PV module performances. *Energy*, 2021, vol. 227, art. no. 120390. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120390>.

12. Wysochin V., Verstak N. Efficiency of use of a hybrid solar collector. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2018, iss. 2(55), pp. 66-71. doi: <https://doi.org/10.15276/opu.2.55.2018.07>.

13. Pan A.C., Del Canizo C., Luque A. Effect of thickness on bifacial silicon solar cells. *2007 Spanish Conference on Electron Devices*, 2007, pp. 234-237. doi: <https://doi.org/10.1109/sced.2007.384035>.

Надійшла (Received) 03.04.2021
Прийнята (Accepted) 12.05.2021
Опублікована (Published) 25.06.2021

Височин Віктор Васильович¹, к.т.н., доц.,
Нікульшин Владимир Русланович¹, д.т.н., проф.,
Денисова Алла Євсєєвна¹, д.т.н., проф.,
¹ Державний університет «Одеська політехніка»,
65044, Одеса, пр. Шевченка, 1,
e-mail: vvwin.od@gmail.com (Corresponding author),
vnikul@paco.net, alladenysova@gmail.com

V.V. Wysochin¹, V.R. Nikulshin¹, A.E. Denysova¹

¹ Odessa Polytechnic State University,
1, Shevchenko Ave., Odessa, Ukraine, 65044.

Investigation of orientation impact on electrical power of bifacial solar elements.

Purpose. To develop the integrated mathematical model for definition of bifacial solar element rational power operation in the various operation conditions caused by orientation of solar panels and power influence. **Methodology.** We have proposed the method of definition of bifacial solar elements irradiation and temperature mode and also electric power production at various orientation of panels. **Results.** We have made analytical investigations of temperature operation conditions of solar elements and their influence on electrical power for various panels orientation in space. Features of irradiation of the forward and back parts of solar panels, conditions of a temperature operating mode and its influence on electric power production are shown. Possibilities of rational conditions of spatial panels orientation are considered. **Originality.** We have suggested and proved the model of definition bifacial irradiation solar panels and thermal conditions of electric power production and also rational conditions of spatial orientation of panels. **Practical value.** The developed by us methodology as well as results of its application, allows to choose rational architecture of a solar power station with high efficiency. References 13, figures 5. **Key words:** bifacial solar photo panels, irradiation of solar panels, orientation of solar cells, power generation.